

## УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

*А. Н. Старухин, Г. В. Михайлов, А. Г. Панфилов,  
Г. Р. Позина, Б. С. Разбирин, П. П. Сырников, А. А. Буш*

Исследованы линейчатые спектры фотолюминесценции перовскитоподобных металл-оксидных соединений (МОС), в том числе сверхпроводящих, в ближней ультрафиолетовой области спектра. Изучены зависимость положения, полуширины и интенсивности спектральных линий от состава и условий приготовления образцов, интенсивности возбуждающего света и температуры в интервале от 2 до 300 К. Показано, что фотолюминесценция во всех исследованных МОС имеет общую природу и обусловлена свечением присутствующих в их составе микрочастиц окиси цинка, причем основной вклад в люминесценцию дает аннигиляция электронно-дырочных пар, связанных с адсорбированными на поверхности частиц гидроксильными группами. Получены экспериментальные свидетельства в пользу влияния сверхпроводящей матрицы на температурное поведение ультрафиолетовой фотолюминесценции при низких температурах.

Среди методов исследования физических свойств высокотемпературных (ВТ) сверхпроводников (СП) важное место занимает оптическая спектроскопия. Свою эффективность в изучении колебательной и электронной структур ВТСП уже показали методы комбинационного рассеяния света и ИК-спектроскопии. В то же время, люминесцентные исследования еще не получили достаточного развития, хотя они представляются перспективными для анализа свойств ВТСП, а также природы содержащихся в них примесей.

Свечение ВТСП наблюдается в широком спектральном интервале, от ИК- до УФ-области [1-3]. Его спектр часто имеет сложный вид и состоит из широких полос и узких линий. Линейчатая люминесценция включает в себя а) спектры редких земель в области 2—2.2 эВ [4, 5], б) линии атомарного кислорода и меди в области 2.5—3.1 эВ [6, 7] и в) наиболее яркую особенность — ряд узких линий излучения, проявляющихся как при электронном, так и при фотовозбуждении в ближнем УФ-диапазоне. Настоящая работа посвящена исследованию свойств этой ультрафиолетовой люминесценции (УФЛ).

Первые исследования УФЛ [8, 9] напрямую связывали появление этого излучения с зарождением сверхпроводящей фазы. В работе [10] указывается, что имеется особенность в температурном поведении интенсивности УФ-излучения вблизи  $T_c$  (критической температуры перехода в СП-состояние). В дальнейшем [11] была подтверждена чувствительность УФЛ к сверхпроводящему переходу, но подвергался сомнению собственный характер люминесценции (см. также [9, 12-14]). Спектральное сходство этого излучения с излучением кристаллов окиси цинка, отмеченное в [9], позволило предположить в работе [13], что УФЛ ВТСП обусловлена свечением микрокристаллов ZnO, присутствующих в купратных СП в качестве примесной микрофазы. В работе [14] наличие УФЛ связывается с излучением другой примесной фазы — BaCuO<sub>2</sub>, также присутствующей в некоторых ВТСП. В то же время в [12] было показано, что УФЛ носит более общий характер: она обнаружена в целом ряде разнородных соеди-

нений. Такое разделение взглядов на природу УФЛ обусловлено в значительной степени недостаточностью имеющихся экспериментальных данных.

С целью установления природы узкополосной УФЛ в изучаемых материалах и выявления ее связи с конкретными электронными переходами в данной работе проведено комплексное исследование УФ-фотолюминесценции, включающее в себя сравнительный анализ люминесценции соединений различного состава, анализ ее температурной зависимости и зависимости от интенсивности возбуждающего света.

Экспериментальная методика. Исследовались керамические образцы, поликристаллические пленки и монокристаллы ВТСИ, полученные по обычной технологии. В качестве источника возбуждения люминесценции применялся импульсный азотный лазер ЛГИ-505 ( $\lambda_{\text{в.в.}} = 3371 \text{ \AA}$ ). Плотность возбуждения, как правило, не превышала  $10 \text{ кВт/см}^2$ . Для регистрации излучения использовался спектральный вычислительный комплекс на базе спектрометра ДФС-12, позволявший получать спектры с разрешением до  $1 \text{ \AA}$ .

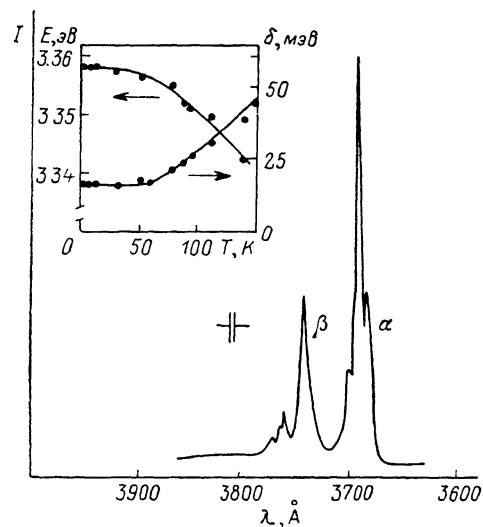


Рис. 1. Спектр УФЛ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ .  $T=2 \text{ K}$ .

На вставке — зависимости от температуры положения максимума  $E(T)$  и полуширины  $\delta(T)$  полосы  $\alpha$ ; спектральная ширина щели  $5 \text{ мэВ}$ .

Плотность возбуждения, как правило, не превышала  $10 \text{ кВт/см}^2$ . Для регистрации излучения использовался спектральный вычислительный комплекс на базе спектрометра ДФС-12, позволявший получать спектры с разрешением до  $1 \text{ \AA}$ .

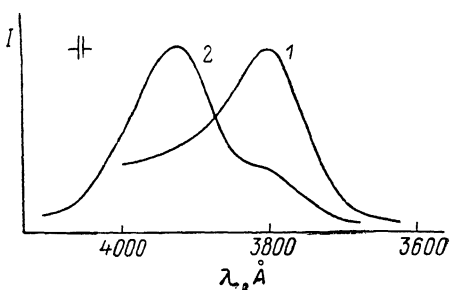


Рис. 2. Спектры УФЛ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$  (1) и поликристалла  $\text{ZnO}$  (2).  $T=300 \text{ K}$ .

Спектр фотолюминесценции. Спектр ультрафиолетовой люминесценции (УФЛ) СП-керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ( $T_c \approx 90 \text{ K}$ ) при температуре  $2 \text{ K}$  приведен на рис. 1. Он состоит из триплета  $3678\text{—}3688\text{—}3694 \text{ \AA}$  и менее интенсивных линий  $3742$  и  $3764 \text{ \AA}$ . Относительная интенсивность компонент триплета может существенно меняться от образца к образцу. При записи спектра с меньшим спектральным разрешением триплет сливается в одну полосу (линия  $\alpha$  в обозначениях работы [10]). Триплетный характер полосы  $\alpha$  отмечается нами впервые.

С увеличением температуры линии излучения уширяются и смещаются в длинноволновую сторону. Вставка на рис. 1 иллюстрирует температурную зависимость спектрального положения линии  $\alpha$  на примере образца  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ . Как видно из этого рисунка, в интервале от  $2$  до  $80 \text{ K}$  эта линия излучения смещается незначительно — менее  $7 \text{ мэВ}$  при полуширине  $\approx 20 \text{ мэВ}$ , в то время как при дальнейшем повышении температуры происходит быстрое ее смещение (практически линейное с температурой, со скоростью  $0.43 \text{ мэВ/K}$ ), так что при  $300 \text{ K}$  оно составляет около  $90 \text{ мэВ}$ .

Аналогичный вид имеет температурная зависимость полуширины линии. В области от  $2$  до  $80 \text{ K}$  ее полуширина ( $\delta$ ) почти не меняется. Дальнейший нагрев приводит к быстрому увеличению  $\delta$ , линейному с температурой (рис. 1). В интервале  $80\text{—}300 \text{ K}$   $\delta \approx 4 k_B T$ , что свидетельствует о наличии сильного электрон-фононного взаимодействия.

Связь УФЛ с составом МОС. Нами были изучены свойства УФЛ в ряде разнородных металлосурьидных соединений (МОС):  $\text{M}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$

( $M=Y, Pr, Eu, Gd$ ),  $[La, Sr]_2CuO_x$  и ВТСП висмутового ряда. Замена иттрия на другие редкоземельные элементы практически не влияет на спектральное положение полос УФ-фотолюминесценции. Аналогичные спектры наблюдаются и в других ВТСП. Следовательно, данное излучение прямо не связано с состояниями атомов редкоземельных элементов, а также бария или стронция, что, в частности, отвергает гипотезу [14] о связи УФЛ с наличием фазы  $BaCuO_2$ .

Существование этой УФ-люминесценции в монокристаллах  $PrBa_2Cu_3O_x$  и  $YBa_2Cu_3O_x$  ( $x \approx 6$ ), не являющихся СП, указывает на то, что она не связана непосредственно и с состоянием сверхпроводимости, как предполагали некоторые авторы (см., например, [9, 10]). Об этом же свидетельствует существование УФ-люминесценции при  $T > T_c$  (рис. 2). Подробнее о температурной зависимости речь пойдет ниже.

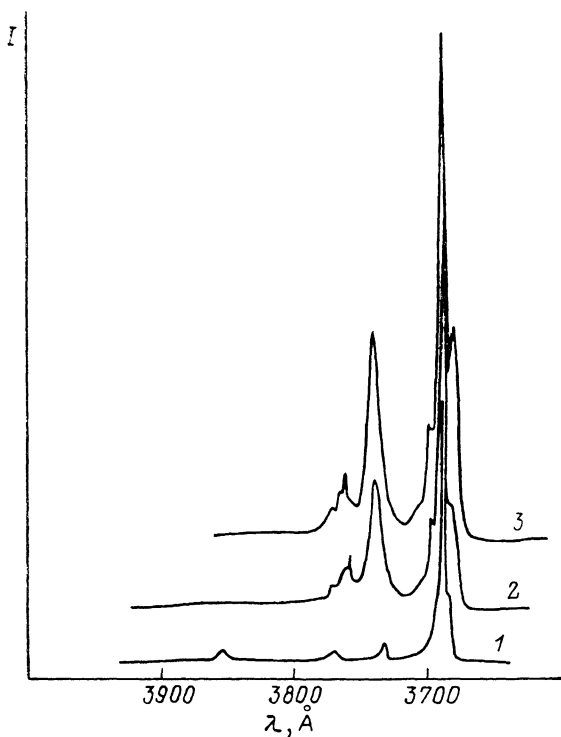


Рис. 3. Спектры УФЛ поликристалла ZnO (1), мелкодисперсного порошка ZnO (2) и керамики  $YBa_2Cu_3O_{6.9}$  (3).  $T=2$  К.

Приведенные экспериментальные данные позволяют предположить, что УФЛ определяется либо собственными дефектами, связанными с состояниями меди или кислорода (входящих в состав всех исследованных МОС), либо примесью содержащей атомы иных элементов и присутствующей во всех этих веществах.

Связь УФЛ с излучением ZnO. Сходство линейчатого спектра УФЛ  $YBa_2Cu_3O_x$  со спектром УФ-излучения кристаллов окиси цинка было отмечено в [9, 13]. Однако при сходстве спектров МОС и кристаллов ZnO между ними имеются и определенные отличия. Наиболее заметна разница между ними при  $T \approx 300$  К (рис. 2). Поэтому предположение о связи УФЛ с излучением ZnO требует более тщательного анализа. Мы провели сравнительное исследование спектров люминесценции МОС и различных образцов окиси цинка — монокристаллов разного качества, поликристаллов и спрессованного в таблетки порошка.

При  $T=2$  К спектр монокристаллического ZnO отличается от спектров МОС большим количеством линий и меньшей их шириной. Напротив, спектры люминесценции поликристаллического и особенно порошкообраз-

ного ZnO (мелкодисперсного с размером зерен менее 1 мкм) удовлетворительно совпадают со спектрами излучения МОС во всем исследованном интервале интенсивностей возбуждения и температур (рис. 3).

Указанный факт, на наш взгляд, согласуется с предположением [13] о том, что за УФЛ ответственны включения ZnO в основной матрице МОС. При этом в соответствии с исследованиями систем с мелкодисперсными (субмикронными) включениями [15], линейные размеры частиц в нашем случае должны быть не менее нескольких сотен ангстрем. Последнее подтверждается и изучением УФЛ направленно легированных МОС  $YBa_2 \times (Cu_{1-z}Zn_z)_3O_x$  ( $z \leq 0.1$ ),<sup>1</sup> в которых естественно ожидать образования относительно небольших кластеров из атомов цинка и кислорода. По-

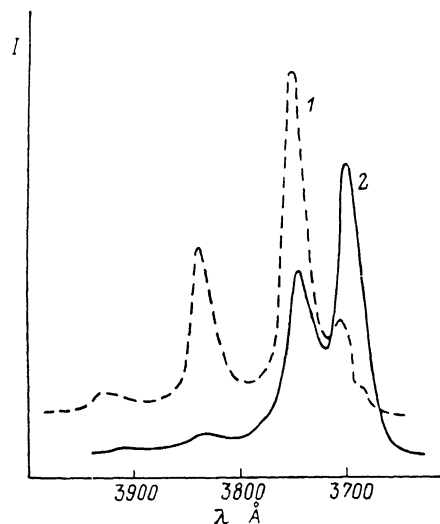


Рис. 4. Спектры УФЛ поликристалла ZnO (1) и  $YBa_2Cu_3O_{6.9}$  (2).  $T=95$  К.

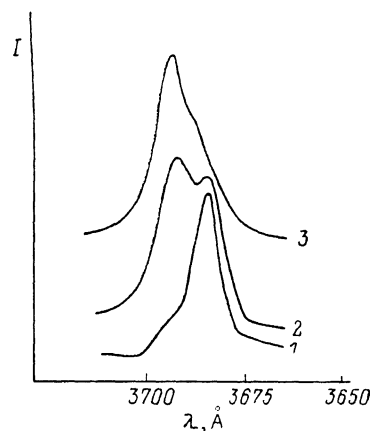


Рис. 5. Зависимость спектра УФЛ  $YBa_2Cu_3O_{6.95}$  от интенсивности возбуждения  $I$ .  $I=I_0$  0.15 (1), 0.3  $I_0$  (2),  $I_0$  (3).  $T=2$  К.

скольку интенсивность УФЛ в этих образцах практически не отличалась от интенсивности УФЛ в нелегированных цинком образцах МОС, можно сделать вывод о том, что такие кластеры Zn—O не дают вклада в УФЛ.

Сравнительный анализ УФЛ ZnO и металлооксидных соединений. Дополнительная информация может быть получена путем сравнительного исследования спектров люминесценции ZnO и металлооксидных соединений в широком интервале температур. Спектры излучения поликристаллического образца ZnO и керамического  $YBa_2Cu_3O_x$  при  $T=95$  К приведены на рис. 4. Видно, что линии в спектре излучения  $YBa_2Cu_3O_x$  по спектральному положению с хорошей точностью совпадают с линиями в спектре окиси цинка: линия  $3701 \text{ \AA}$  ( $\alpha$ ) соответствует излучению электронно-дырочной пары, связанной на нейтральном доноре ( $3702 \text{ \AA}$  в ZnO); линии  $3742$  ( $\beta$  — в обозначениях [10]) и  $3835 \text{ \AA}$  соответствуют первому и второму фоновым повторениям линии свободного экситона в окиси цинка ( $3748$  и  $3833 \text{ \AA}$ ). Наблюдается лишь разница в относительной интенсивности линий в спектрах.

То, что в некоторых образцах металлооксидных соединений удается наблюдать и значительно более слабые, чем линия  $\beta$ , полосы излучения, совпадающие по спектральному положению с линиями излучения свобод-

<sup>1</sup> Содержание цинка в нелегированных образцах МОС, по данным эмиссионного спектрального анализа, составляло  $\approx 0.1 \%$ .

ного экситона в окиси цинка с одновременным рождением двух и трех ЛО-фононов (в  $\text{ZnO}$   $\hbar\omega_{LO}=72$  мэВ), является еще одним подтверждением связи этих полос с излучением  $\text{ZnO}$ . Необычная для совершенных кристаллов окиси цинка относительно большая интенсивность излучения первого фононного повторения свободного экситона может быть объяснена значительным содержанием дефектов в микрочастицах  $\text{ZnO}$  [16].

При  $T=2$  К совпадение спектра люминесценции керамики МОС со спектром поликристаллического  $\text{ZnO}$  (рис. 3) ухудшается. В спектре излучения окиси цинка начинают доминировать линии примесного происхождения — линия связанного экситона  $J_z$  и ее фононные повторения (3688, 3770, 3856 Å) [17]. Спектр же УФЛ МОС практически не изменяется, появляется лишь обычно отсутствующая в спектре  $\text{ZnO}$  линия — 3678 Å (рис. 1). Подобная линия наблюдается в некоторых монокристаллах окиси цинка низкого качества и связывается с аннигиляцией экситонов, связанных на поверхностных дефектах адсорбционного происхождения [18]. Таким образом, полного совпадения в температурных зависимостях спектров излучения окиси цинка и МОС не наблюдается.

Зависимость спектра УФЛ от интенсивности возбуждения. Связь исследуемой люминесценции с примесью микрофазы  $\text{ZnO}$  согласуется с наблюдавшейся нами зависимостью спек-

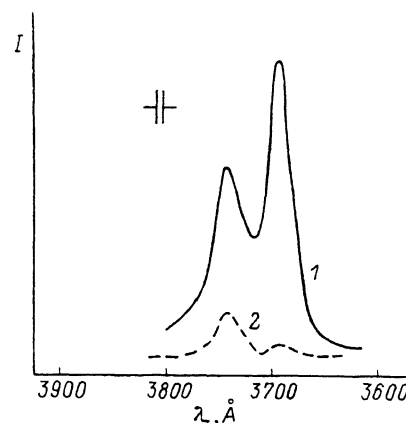


Рис. 6. Влияние отжига на УФЛ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ . Спектр образца при  $T=2$  К до (1) и после (2) отжига.

тра УФЛ от интенсивности возбуждающего света. С ростом возбуждения компоненты триплета  $\alpha$  с  $\lambda=3678, 3688$  Å быстро насыщаются и в спектре начинает доминировать линия с  $\lambda=3694$  Å, интенсивность которой сверхлинейно зависит от плотности возбуждения (рис. 5). Подобный эффект известен для кристаллов  $\text{ZnO}$  и связан с оптической перезарядкой примесных центров, что приводит к появлению новых центров излучательной рекомбинации электронов и дырок [19]. Отметим, что в кристаллах окиси цинка при еще более высоких уровнях возбуждения в этом же спектральном диапазоне наблюдается полоса  $M$ , обусловленная коллективными явлениями в электронной подсистеме полупроводника. В случае МОС такая полоса отсутствует. Максимум наблюдаемой линии в отличие от полосы  $M$  практически не смещается в длинноволновую сторону с увеличением плотности возбуждения. Отсутствие полосы  $M$  мы связываем с сильной дефектностью исследуемых образцов, приводящей к уменьшению времени жизни свободных носителей.

Влияние отжига образцов на спектр УФЛ. Важную информацию о природе примесных центров, ответственных за УФЛ, дали эксперименты по влиянию отжига на спектры излучения. Отжиг проводился в течение часа на воздухе при  $T=300$  °С. Подобный отжиг не приводит к заметному изменению содержания кислорода в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  [20], но существенно влияет на вид спектра УФЛ отжигаемых образцов. Интенсивность полосы  $\alpha$  (3690 Å) после отжига падала более чем на порядок, интенсивность полосы  $\beta$  (3740 Å) — примерно в два раза (штриховая кривая на рис. 6).

Отметим, что и в экспериментах с отжигом наблюдается аналогия в поведении спектров УФЛ МОС и мелкодисперсного порошка окиси цинка. Отжиг порошка  $\text{ZnO}$  в течение часа при 300 °С также приводит

к резкому (в 4—5 раз) падению интенсивности ультрафиолетового излучения. В то же время аналогичный отжиг поликристаллических образцов и монокристаллов ZnO почти не влияет на интенсивность их свечения. Эффект отжига естественно связать с большим вкладом поверхностных состояний, в частности, абсорбированных молекул, в формирование УФ-люминесценции.

После выдержки отожженного порошка в течение нескольких минут при комнатной температуре на воздухе или в парах воды интенсивность свечения восстанавливается. Заметим, что выдержка порошка в инертной атмосфере, например, в гелии, не оказывает влияния на интенсивность люминесценции. Отметим, наконец, что скорость восстановления свечения в порошке ZnO выше, чем в керамике МОС.

Столь сильное влияние отжига при относительно невысокой температуре свидетельствует в пользу связи УФЛ с абсорбированными примесными молекулами. Согласно [20], при  $T > 300$  °C происходит интенсивное выделение из металлооксидного соединения гидратированной воды, гидроксильные группы которой занимают позиции кислорода в кристаллической структуре МОС. Поскольку однозарядные группы  $\text{OH}^-$  оказываются менее прочно связанными, чем ионы кислорода, при нагревании они начинают выделяться при более низкой температуре (300 °C), чем кислород.

Таким образом, можно полагать, что именно гидроксильные группы являются существенной составной частью излучающих центров, ответственных за УФЛ в МОС.<sup>2</sup> Предположение о связи УФЛ с адсорбированными вблизи поверхности материала примесными молекулами косвенно подтверждается и данными работы [12] о зависимости интенсивности УФЛ от длительности пребывания образцов на воздухе.

Известно [21], что поверхность окислов подвергается гидратации, причем присоединенные группы  $\text{OH}^-$  становятся донорами. С другой стороны, установлено [17], что группа линий связанных экситонов в ZnO (в том числе полоса  $J_a - \alpha$ ) возникает при наличии в окиси цинка большой концентрации доноров. Это также свидетельствует в пользу того, что группы  $\text{OH}^-$  являются центрами, ответственными за основные полосы УФЛ.

Температурная зависимость интенсивности УФЛ. Итак, УФЛ связана со свечением микровключений фазы ZnO в основной матрице металлооксидного соединения. Особый интерес в этом случае представляет исследование взаимодействия между примесью и собственно ВТСП, которое должно проявиться, в частности, в зависимости интенсивности УФЛ от температуры. Наблюдавшуюся в работах [10, 11] особенность в поведении УФЛ при  $T \approx T_c$  можно было бы связать с влиянием на примесь сверхпроводящей матрицы. Заметим, однако, что в наших экспериментах мы не зарегистрировали такой особенности.

Иным проявлением влияния матрицы ВТСП в сверхпроводящем состоянии на примесную УФЛ, на наш взгляд, является наблюдавшаяся нами необычная зависимость интенсивности основной полосы  $\alpha$  от температуры при  $T < T_c$ .

Как правило, интенсивность полосы  $\alpha$  максимальна при низких температурах ( $T \approx 2$  К) и монотонно спадает с повышением  $T$ , что находит свое естественное объяснение в рамках предложенной выше интерпретации полосы. Действительно, в результате повышения температуры должна происходить тепловая ионизация связанных экситонов, что и приводит к уменьшению интенсивности соответствующих линий излучения [22]. Именно такое поведение примесных полос люминесценции наблюдается в полупроводниковых кристаллах (в том числе — в окиси цинка).

Однако в ряде образцов металлооксидных соединений нами наблюдался качественно иной, немонотонный, вид зависимости интенсивности полосы  $\alpha$  от температуры. В этих образцах интенсивность УФЛ при  $T = 2$  К отно-

<sup>2</sup> В работе [6] указывалось на связь УФЛ с решеточным кислородом в ВТСП. Однако в условиях эксперимента [6] с не меньшей эффективностью, чем кислородная дегазация ВТСП, должна была происходить десорбция  $\text{OH}^-$ .

нительно мала (в некоторых образцах ее даже не удается зарегистрировать), с повышением температуры она увеличивается, достигая максимальной величины при 10—20 К, а затем быстро спадает (рис. 7). Такая немонотонная зависимость интенсивности примесной люминесценции от температуры необычна для полупроводниковых материалов и мы связываем ее с влиянием сверхпроводящей матрицы. Это влияние должно быть максимально в области контакта между частицами полупроводниковой фазы ZnO и сверхпроводящей фазой. Можно предположить, что наличие спаренных носителей заряда в приконтактной области полупроводника уменьшает вероятность захвата носителей поверхностными примесными центрами и, как следствие, приводит к уменьшению интенсивности рекомбинационного излучения через эти центры пропорционально доле «нормальных» носителей заряда. В результате интенсивность излучения

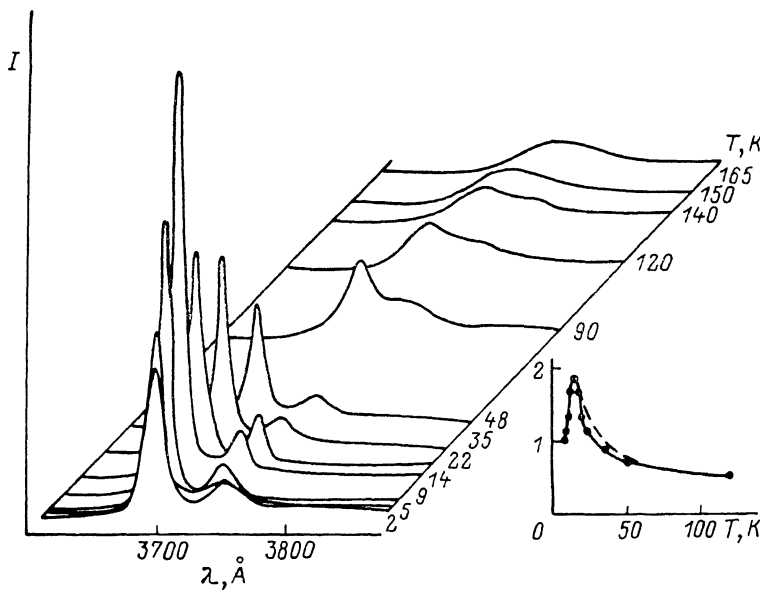


Рис. 7. Зависимость спектра УФЛ  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  от температуры.

На вставке — аналогичная зависимость интенсивности полосы  $\alpha$  от температуры для образца  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ . Сплошная линия — эксперимент, штрихи — теория.

поверхностными центрами в полупроводнике, контактирующем со сверхпроводящей фазой, будет минимальна при низких температурах.

С повышением температуры в связи с увеличением доли нормальных носителей [23] интенсивность излучения должна возрастать вплоть до критической температуры  $T_{c,s}$  на границе раздела ( $T_{c,s} < T_c$  [24]), при которой все носители в полупроводнике перейдут в нормальное состояние. При  $T > T_{c,s}$  должно наблюдаться обычное температурное тушение примесной люминесценции за счет тепловой ионизации центров [22].

В этой простой модели зависимость интенсивности УФЛ от температуры описывается выражением

$$I(T) \sim \frac{f(T)}{1 + B \exp(-E_0/k_B T)}, \quad f(T) = \begin{cases} (T/T_{c,s})^4, & T \leq T_{c,s} \\ 1, & T > T_{c,s} \end{cases} \quad (1)$$

$E_0$  — энергия активации примеси.

В других образцах — с обычной монотонной зависимостью интенсивности полосы  $\alpha$  от температуры, — по-видимому, отсутствует прямой контакт между частицами ZnO и сверхпроводящей фазой, например, из-за деградации СП на границе раздела [25]. В этом случае носители заряда в полупроводнике во всем интервале температур находятся в нормальном

состояния, что и определяет обычный монотонный ход температурной зависимости интенсивности УФЛ ( $f(T) = \text{const}$ ).

В реальных материалах влияние сверхпроводящей матрицы испытывает лишь часть микровключений, и поэтому зависимость  $I(T)$  будет иметь более сложный вид

$$I(T) \sim \left[ \frac{1 - \alpha}{1 + B \exp(-E_0/k_B T)} + \frac{\alpha \cdot f(T)}{1 + B \exp(-E_0/k_B T)} \right]. \quad (2)$$

Со временем, по мере деградации образцов, т. е. с увеличением в образцах доли диэлектрической фазы (с уменьшением константы  $\alpha$  в формуле (2)), немонотонная зависимость интенсивности УФЛ от температуры должна все более и более приближаться к обычной монотонной, что и наблюдается экспериментально (штриховая кривая на рис. 7 соответствует  $\alpha \simeq 1/2$ ).

Полученные результаты указывают на необходимость дальнейших исследований примесной люминесценции ВТСП, поскольку изучение взаимного влияния примеси и СП-матрицы люминесцентными методами может дать дополнительную информацию как о процессах на границе раздела сверхпроводник (ВТСП)—полупроводник, так и о свойствах собственно ВТСП.

#### Список литературы

- [1] Луцкич Ч. Б. и др. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1988. Т. 52. № 4. С. 685—690.
- [2] Елисеев А. П. и др. // СФХТ. 1989. Т. 2. № 12. С. 60—65.
- [3] Фуголь И. Я. и др. // ФНТ. 1989. Т. 15. № 11. С. 1301—1310.
- [4] Tissue V. M., Wright J. C. // J. Lumin. 1987. V. 37. N 3. P. 117—121; 1988. V. 42. N 4. P. 173—180.
- [5] Agladze N. I. et al. // Sol. St. Comm. 1989. V. 69. N 4. P. 385—386.
- [6] Еременко В. В. и др. // ФНТ. 1988. Т. 14. № 8. С. 882—885.
- [7] Фуголь И. Я. и др. // ФНТ. 1988. Т. 14. № 10. С. 1104—1108.
- [8] Луцкич Ч. Б. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. № 3. С. 122—124.
- [9] Луцкич Ч. Б. и др. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 12. С. 3667—3672.
- [10] Еременко В. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. № 10. С. 529—531.
- [11] Панфилов А. С. и др. // ФНТ. 1989. Т. 15. № 7. С. 792—797.
- [12] Попова М. Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. № 11. С. 616—618.
- [13] Гайсин В. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 49. № 11. С. 597—599.
- [14] Горн И. А. и др. // Тез. докл. II Всес. конф. ВТСП. Киев, 1989. Т. II. С. 147.
- [15] Екимов А. I. et al. // Sol. St. Comm. 1985. V. 56. N 11. P. 921—924.
- [16] Вербин С. Ю. и др. // ФТТ. 1977. Т. 19. № 11. С. 3468—3470.
- [17] Кузьмина И. П., Никитенко В. А. Окись цинка. М.: Наука, 1984. 166 с.
- [18] Савихин С. Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. № 3. С. 113—116.
- [19] Разбирин Б. С. и др. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 9. С. 2808—2812.
- [20] Филагов С. К. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 4. С. 32—34.
- [21] Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела. М.: Мир, 1980. 488 с.
- [22] Гельмонт Б. Л. и др. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. № 3. С. 322—335.
- [23] Дмитренко И. М. В мире сверхпроводимости. Киев: Наукова думка, 1981. 196 с.
- [24] Алфеев В. Н. Полупроводники, сверхпроводники и параэлектрики в криоэлектронике. М.: Сов. радио, 1979. 311 с.
- [25] Соколов А. Н. и др. // ЖНХ. 1989. Т. 34. № 8. С. 1923—1927.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
25 июля 1990 г.